

基于自适应陷波滤波器的伺服系统谐振频率估计及抑制

龚文全, 罗炳章

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 511400)

摘要: 在使用陷波滤波器抑制伺服系统机械谐振时,需要获取准确的机械谐振频率。为了快速检测出谐振频率,提出了一种基于自适应陷波滤波器(ANF)的机械谐振频率估计算法,通过速度误差信号分析,实现谐振频率在线快速辨识。首先,建立柔性连接伺服系统模型;然后,对 ANF 频率估计算法进行分析,并且与常用的快速傅里叶变换(FFT)频率检测算法的分析精度和计算速度进行对比。数值比较和仿真验证表明,ANF 频率估计算法可以更快地实现谐振频率的精确检测。最后搭建试验平台,以 ANF 频率估计的结果作为陷波器的中心频率,成功实现了电机转速振荡的抑制,验证了该方法的有效性。

关键词: 柔性伺服系统; 机械谐振抑制; 自适应陷波滤波器; 频率检测

中图分类号: TM 383.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)11-0037-06

Resonance Frequency Estimation and Suppression of Servo System Based on Adaptive Notch Filter

GONG Wenquan, LUO Bingzhang

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 511400, China)

Abstract: When using notch filter to suppress mechanical resonance of servo system, it was necessary to obtain accurate mechanical resonance frequency. In order to detect the mechanical resonance frequency quickly, the adaptive notch filter (ANF) frequency estimation strategy for error signal analysis was proposed. Firstly, the mechanical resonance model of flexible connection servo system was established. Secondly, the time consuming and analysis accuracy were compared between the ANF algorithm and fast Fourier transform (FFT). The numerical and the simulation results show that the proposed method is faster than FFT, and resonance frequency can be identified online quickly. Finally, experimental platform was built and the results of ANF frequency estimation were used as the center frequency of the trap. The suppression of motor speed oscillation was successfully realized, and the effectiveness of the algorithm was verified by experiment.

Key words: flexible servo system; mechanical resonance suppression; adaptive notch filter; frequency detection

0 引言

在交流伺服系统中,伺服电机一般需要通过滚珠丝杠副、联轴器或者齿轮等机械传动机构来驱动负载。这些机械传动环节本身存在一定的柔性,传动柔性会导致伺服系统发生机械谐振^[1]。

谐振发生时电机电流会发生振荡,使电机速度控制失准,不仅会产生噪声,还会对机械传动环节造成破坏,甚至出现断轴等后果。添加陷波滤波器进行振荡抑制,是目前常用的一种解决方法^[2]。在实际应用中,伺服系统固定松动、元部件改变等原因,会导致谐振频率发生偏移。为了实现良好

作者简介: 龚文全(1993—),男,硕士研究生,研究方向为伺服系统机械谐振抑制。

罗炳章(1994—),男,硕士研究生,研究方向为滚珠丝杠进给系统振动抑制。

的抑制效果,必须对机械谐振频率进行精确检测。

国内外学者在实现机械谐振检测方面进行了大量研究。文献[3]采用伪随机信号扫描法,离线获得系统谐振频率信息,然后设计二阶陷波滤波器,在离线状态下实现了谐振抑制。文献[4]提出了一种由快速傅里叶变换(FFT)谐波检测和传统陷波滤波器相结合构成自适应陷波滤波器(ANF)进行在线抑制谐振的方法。但是,FFT算法检测谐振频率点的速度太慢,而且需要占据一定的空间来存放数据,不能很好地满足系统实时性的要求。文献[5]采用滑动离散傅里叶变换(DFT)算法对谐振频率进行辨识,与FFT相比,滑动DFT算法通过推导得出递推关系式的形式,减小了计算量,但是仍然存在频谱泄漏和栅栏效应等问题。文献[6]对小波分析作出了阐述,但是仍然面临着如何选取小波基的问题,而且小波分析算法目前的研究还不够深入,应用中存在许多困难。文献[7]提出了一种在线迭代算法,通过不断缩小目标频率所在的范围最后确定谐振频率,虽然解决了在高阻尼比情况下传统频谱分析算法不准确的问题,但是计算量和运算时间较大,不适用于对实时性要求较高的系统。

为了避免采用DFT及其分支算法在伺服系统机械谐振频率检测中存在计算延时的问题,本文提出一种基于ANF频率估计的机械谐振频率估计方法^[8-10],根据ANF的频率特性,对转速误差信号进行在线分析,获得谐振频率。因为ANF频率估计算法全部在时域内完成,与常规DFT及其分支的频域分析算法相比,ANF频率估计算法不需要考虑频率泄漏和时间窗选取的问题,也不需要大量的数据存储,所以该算法在实时性要求较高的系统中具有明显的优势。将ANF估计到的频率作为谐振频率,设计的陷波器成功实现了电机转速振荡抑制。试验结果验证了ANF频率估计算法检测速度的准确性和快速性。

1 柔性伺服系统建模及谐振分析

1.1 机械谐振机理分析

在交流伺服系统中,电机与负载之间常采用传动轴、滚珠丝杠副或者联轴器等传动机构进行连接,然而传动机构并不是理想刚性的,电机与负载之间属于柔性连接。在分析伺服机械谐振问题时,常将

柔性伺服系统简化为二质量模型,如图1所示。

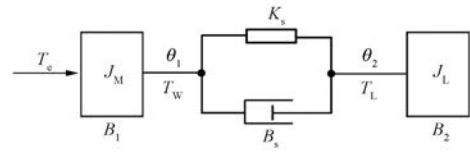


图1 典型二质量模型示意图

根据以上关系,可建立微分方程组:

$$\begin{cases} J_m \ddot{\theta}_1 = T_e - B_1 \dot{\theta}_1 - T_w \\ J_L \ddot{\theta}_2 = T_w - B_2 \dot{\theta}_2 - T_L \\ T_w = B_s (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + K_s (\theta_1 - \theta_2) \\ \omega_1 = \dot{\theta}_1 \\ \omega_2 = \dot{\theta}_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: J_m ——电机转动惯量;
 θ_1 ——电机转角;
 T_e ——电机电磁转矩;
 B_1 ——电机转轴阻尼;
 T_w ——弹性连接转矩;
 J_L ——负载转动惯量;
 θ_2 ——负载转角;
 B_2 ——负载阻尼;
 T_L ——负载转矩;
 B_s ——阻尼系数;
 K_s ——刚度系数;
 ω_1 ——电机转速;
 ω_2 ——负载转速。

若忽略阻尼系数,对系统模型进行化简,对系统微分方程组再进行拉普拉斯变换,可推导出电机转速与电磁转矩之间的传递函数:

$$G(s) = \frac{\omega_1}{T_e} = \frac{1}{(J_m + J_L)s} \cdot \frac{J_L s^2 + K_s}{\frac{J_m J_L}{J_m + J_L} s^2 + K_s} \quad (2)$$

对式(2)进行整理可得:

$$G(s) = \frac{\omega_1}{T_e} = \frac{J_L s^2 + K_s}{J_m J_L s^3 + (J_m + J_L) K_s s} \quad (3)$$

将式(3)的共轭零点称为抗谐振频率点(ARF),共轭极点称为自然振荡频率点(NTF)。

共轭零点:

$$\omega_{ARF} = \sqrt{\frac{K_s}{J_L}} \quad (4)$$

共轭极点:

$$\omega_{NTP} = \sqrt{\frac{K_s(J_m + J_L)}{J_m J_L}} \quad (5)$$

式(3)的谐振方程中,存在一对共轭极点,并且这对共轭极点与虚轴非常接近,会导致系统处于欠阻尼或者临界振荡的状态,一旦有对应频率的激励信号,系统的稳定状态很容易受到破坏,在伺服系统中称为机械谐振,表现为电机转速出现大幅度振荡。

1.2 谐振频率变化的原因

引起伺服系统谐振频率变化的因素很多,比如系统磨损、传动部件老化松动、负载惯量变化,信号突变以及系统自身特性改变等因素,都有可能引起谐振点变化。原因是上述变化影响了刚度系数或者惯量值。

由式(5)可知,谐振频率受到电机转动惯量 J_m 、传动环节刚度系数 K_s 和负载转动惯量 J_L 等因素的影响,更换传动装置或者增减负载惯量,均会改变谐振频率。图2所示为取不同传动刚度时式(3)所对应的伯德图。

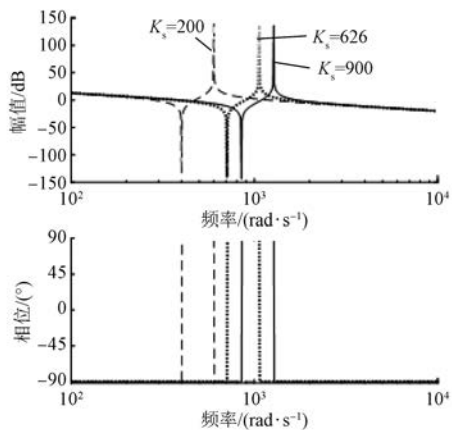


图2 改变传动刚度系数的伯德图

当使用陷波滤波器对机械谐振进行抑制时,必须要保证谐振频率的准确性。在实际工程中,更换传动装置或者增减负载惯量时,谐振频率将发生改变,如果不能对谐振频率进行准确的检测,并且对陷波滤波器的中心频率进行调整,可能会导致谐振抑制失败。

2 频率估计算法

使用陷波滤波器滤除柔性伺服系统中的谐振频率,谐振频率点的精确检测是有效抑制机械谐

振的前提。本文采用 ANF 来提取谐振频率。

假设输入信号的基波角频率为 ω_0 , 初始状态下,设置陷波器的中心频率初始值为 θ ,如图3所示。

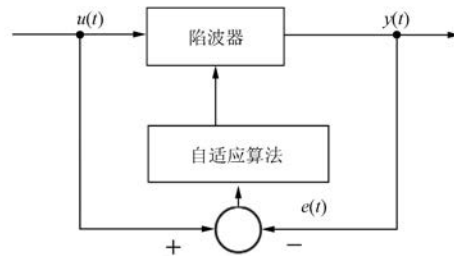


图3 ANF 频率估计框图

把输入信号 $u(t)$ 通过陷波频率为 θ 的滤波器,得到输出信号 $y(t)$, $y(t)$ 可以视为 $u(t)$ 的瞬时状态量;再将瞬时状态量 $y(t)$ 作为反馈信号,与输入信号 $u(t)$ 进行比较得到误差信号 $e(t)$ 。当 $e(t) \neq 0$ 时,说明此时陷波滤波器的中心频率并不合适,自适应算法不断调整陷波中心频率 θ 。直到 $e(t) = 0$,此时 $\omega_0 = \theta$,当前陷波滤波器的中心频率就是输入信号的基波角频率。

当输入信号为 $u = A \sin(\omega_0 t)$ 时,复杂的全局收敛的归一化频率估计器的微分方程为

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\theta^2 x + 2\xi\theta e(t) \\ \dot{\theta} = -\gamma x e(t) \\ e(t) = u(t) - \dot{x} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ξ ——正实数的阻尼比系数;

$e(t)$ ——输入信号 $u(t)$ 与提取出的状态分量 \dot{x} 之间的误差值;

γ ——自适应增益系数,影响估计算法收敛速度。

ANF 必要的稳定性条件变为 $\frac{A^2 \gamma}{2} < 1$ 。

可得到唯一解:

$$\mathbf{O} = \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{A}{\omega_0} \cos(\omega_0 t) \\ A \sin(\omega_0 t) \\ \omega_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: θ ——检测出的输入信号基波角频率。

3 仿真实验

3.1 单频率信号估计测试

在 MATLAB 环境下进行仿真,来验证估计器

的动态响应速度和稳态响应精度。为了方便讨论,取输入信号为正弦信号 $u = A\sin(\omega_0 t)$, ω_0 为输入信号基波角频率,单位为 Hz,参考频率值取 300 Hz。2 种模拟频率跳变条件下的变化结果如下。

(1) 模拟频率大幅度跳变的情况。考虑输入信号的幅值保持为 1.0 V,初始频率为 220 Hz,在 $t=0.1$ s 时跳变到 100 Hz,在 $t=0.2$ s 重新恢复至 220 Hz,如图 4 所示。从图 4 可以发现,频率估计器均能在 0.05 s 之内实现收敛,误差范围在 1 Hz 之间。

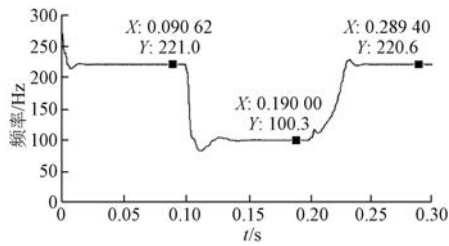


图 4 频率跳变 120 Hz 估计结果

(2) 模拟频率小范围偏移的情况。考虑输入信号的幅值保持为 1.0 V,初始频率为 100 Hz,在 $t=0.1$ s 时变为 101 Hz,在 $t=0.2$ s 变为 99 Hz,频率估计器均能在 0.05 s 之内收敛,误差范围在 0.5 Hz 之间,如图 5 所示。频率变化较小时,估计值存在毛刺现象,因此对估计值进行平均化处理,最终得到稳定的估计频率。

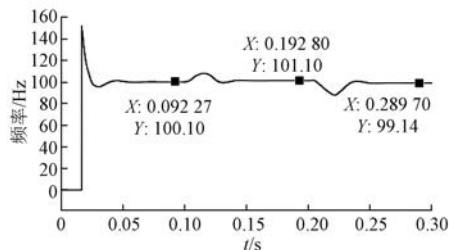


图 5 频率波动 1 Hz 平均化处理

通过 PowerGUI 中的 FFT 工具,对输入信号进行频谱分析,如图 6 的所示。由图 6 可以发现,通过 FFT 检测到的频率更加准确。

但是 FFT 的高检测精度是需要大数据点采样支持的。对于永磁同步电机(PMSM)双闭环控制系统,当电流环采样频率为 1.6×10^4 Hz 时,按照其对应关系,速度环采样频率一般取 1 600 Hz。根据 $f = f_s / N$ 可知,当 $f_s = 1\ 600$ Hz 时,FFT 需要采集 1 600 个数据点,才能够实现 1 Hz 的精度,仅在数据存储上,就需要耗费 1 s 的时间。如果要求

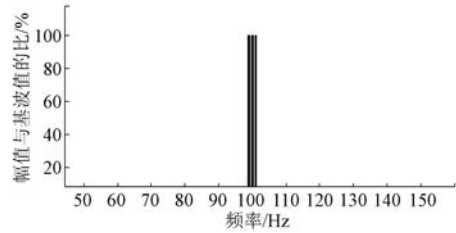


图 6 FFT 分析频率图谱

在 0.05 s 内完成频率检测,FFT 最多也只能存储 80 个数据点,此时的频率分辨率只有 20 Hz。

由此可见,在相同检测精度下,ANF 频率估计算法运算速度更快,需要的时间更少。DFT、短时傅里叶变换等频率分析工具,属于同类型的频谱分析算法,均需要在存储足够的数据点之后才能进行准确分析,而 ANF 频率估计算法不需要数据存储,节约了控制芯片的存储空间。

3.2 基于 ANF 的谐振频率检测

为了验证 ANF 频率估计算法在检测机械谐振频率中的有效性,在 Simulink 中搭建柔性 PMSM 双闭环调速系统仿真模型。控制框图如图 7 所示。表贴式 PMSM 仿真参数如表 1 所示。

表 1 表贴式 PMSM 仿真参数

参数名称	参数值
电机额定功率/kW	0.75
电机额定电流/A	7.5
电机额定转矩/N·m	7.5
电机额定转速/(r·min ⁻¹)	2 500
电机惯量/(N·m ²)	0.001 25
定子电阻/Ω	0.443
定子电感/mH	1.487 5
最大转矩电流/A	12
负载惯量/(N·m ²)	0.001
速度控制器比例系数 K_p	6.425
速度控制器积分系数 K_i	82
ANF 频率检测 ξ	0.25
ANF 频率检测 γ	0.3
ANF 频率检测起始频率/Hz	300
传动轴弹性 $K_{s1}/(N·m·rad^{-1})$	626
传动轴弹性 $K_{s2}/(N·m·rad^{-1})$	800

根据式(5)可知,传动轴弹性取 K_{s1} 和 K_{s2} 时,机械谐振频率分别对应的理论值为 $\omega_1 = 170$ Hz

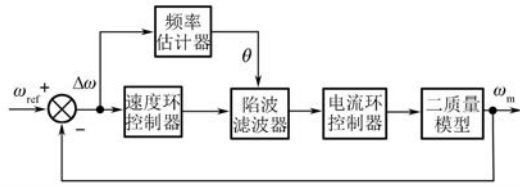


图 7 基于陷波滤波器的谐振抑制框图

和 $\omega_2 = 191 \text{ Hz}$, 对转速误差进行 ANF 频率估计, 检测结果如图 8 所示。

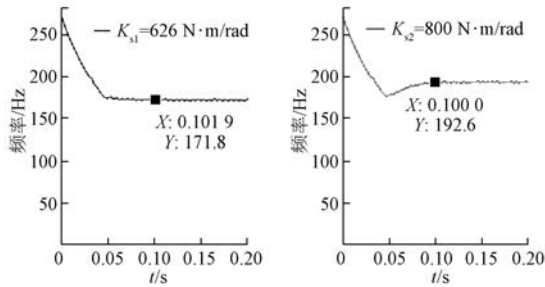


图 8 2 种刚度频率估计结果

经过 ANF 频率估计算法, 在 0.1 s 之内, 检测得到的谐振频率分别为 $\omega_1 = 171.8 \text{ Hz}$ 和 $\omega_2 = 192.6 \text{ Hz}$, 同理论值对比, 检测误差分别为 $\Delta\omega_1 = 1.8 \text{ Hz}$ 和 $\Delta\omega_2 = 1.6 \text{ Hz}$, 均在 2 Hz 之内。因为实际使用的二阶陷波滤波器并非理想的单频点滤波, 而是具有一定的陷波频带宽度滤波, 所以陷波中心频率处存在较小误差, 也不会对实际的谐振抑制效果造成很大的影响。

3.3 电机转速振荡抑制仿真

为了验证 ANF 频率估计算法所检测到的结果是否准确, 取刚度系数为 K_{s1} , 以检测出的频率为谐振频率, 速度给定为 130 rad/s, 使伺服系统发生机械谐振, 对比无陷波处理的电机转速与使用常规二阶陷波滤波器的电机转速, 仿真结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出, 当伺服系统发生机械谐振时, 如果仅使用 PI 控制器, 电机转速出现持续振

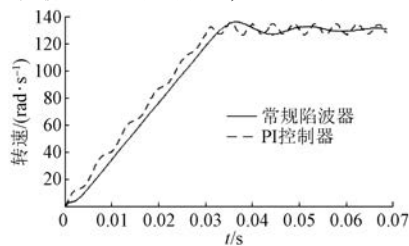


图 9 常规二阶陷波滤波器谐振抑制

荡, 并且无法收敛, 加入常规陷波滤波器之后, 电机转速基本呈现平稳状态, 最终稳定在速度给定值, 振荡得到抑制, 表明 ANF 检测结果正确。

4 试验研究

搭建 PMSM 柔性负载伺服系统平台如图 10 所示。整个系统由数字式交流伺服驱动单元、GSK 表贴式 PMSM 以及柔性负载 3 部分组成。

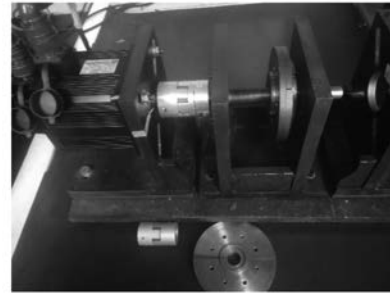


图 10 试验平台

使用 ANF 频率估计算法, 对速度误差信号进行估计, 与 FFT 结果对比, 以验证 ANF 估计算法的有效性。通过 Code Composer Studio 中的 Graph 工具, 对 ANF 的估计结果平均化处理后进行抓取, 通过 NI 公司的模块化平台以及 LabVIEW 工具, 显示电机速度以及 FFT 结果, 使用横河公司的混合示波器获取相电流波形。

试验所用控制参数如表 2 所示。

表 2 试验参数

参数名称	参数值
电流控制器比例系数 K_p	5
电流控制器积分系数 K_i	0.001 5
速度控制器比例系数 K_p	20
速度控制器积分系数 K_i	0.035
给定速度指令 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	2 100
ANF 频率检测 ξ	0.15
ANF 频率检测 γ	0.1
ANF 频率检测起始频率 / Hz	500

4.1 ANF 谐振频率估计验证试验

负载侧使用 2 个惯量盘, 在高控制增益状态下, 电机转速发生振荡, 最大幅值接近 2 180 r/min, 如图 11(a) 所示。

对其局部进行放大, 通过计算可知, 此时电机

速度振荡频率约为 416 Hz,如图 11(b)所示。

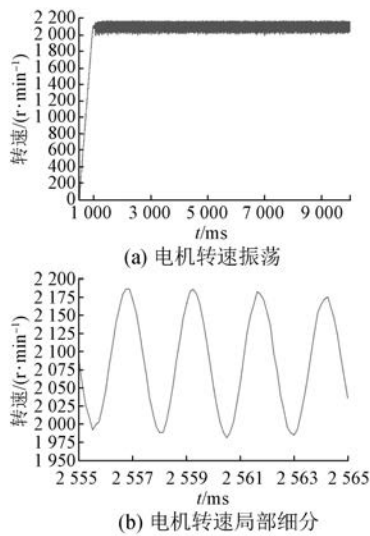


图 11 电机转速图

使用 ANF 频率估计结果以及 FFT 结果如图 12 所示。

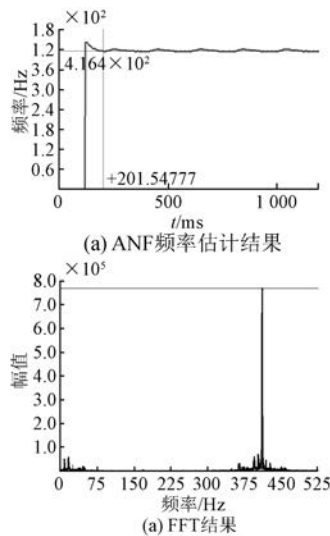


图 12 ANF 和 FFT 结果

此时电机转速实际振荡频率约在 416 Hz, ANF 频率估计算法经过 0.1 s 达到稳定,基本维持在约 416.4 Hz,与 FFT 结果保持一致,且 ANF 的分辨率小于 1 Hz。

4.2 转速振荡抑制试验

ANF 频率估计算法的准确性得到验证之后,以 ANF 频率估计算法得到的结果为陷波滤波器的中心频率,设计二阶陷波滤波器,在电机振荡中途加入陷波器,电机转速抑制效果如 13(a)所示,

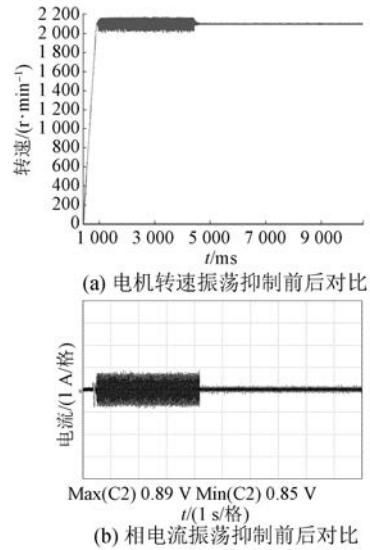


图 13 转速和相电流振荡抑制前后对比

相电流震荡抑制如图 13(b)所示。添加陷波滤波器之后,电机转速振荡被迅速抑制,转速误差最终保持在 7 r/min 之内,衰减比例达到 91.2%,基本实现平稳输出。

5 结 语

本文针对交流伺服系统机械谐振频率检测问题,提出使用 ANF 频率估计的算法。对所提出的方法进行了理论分析和仿真,与常规 FFT 检测算法所需时间进行了对比,说明 ANF 算法拥有更快的估计速度。通过交流伺服平台试验,验证了所提出方法的准确性,并且根据 ANF 估计结果,设计陷波器对电机转速振荡进行抑制。试验结果表明,电机转速和相电流振荡均被成功抑制,验证了所提出的 ANF 频率估计算法的有效性。

【参考文献】

[1] 李云松,陈小安.精密传动系统伺服驱动机械谐振灵敏度分析[J].机械传动,2017,41(4): 24.
 [2] CHEN Y, YANG M, LONG J, et al. Analysis of oscillation frequency deviation in elastic coupling digital drive system and robust notch filter strategy [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019,66(1): 90.
 [3] 杨明,郝亮,徐殿国.双惯量弹性负载系统机械谐振机理分析及谐振特征快速辨识[J].电机与控制学报,2016,20(4): 112. (下转第 93 页)

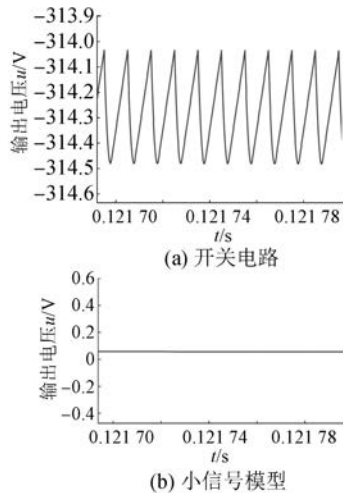


图 14 小信号模型与开关电路模型对比(短时)

4 结 语

本文建立了 Buck-Boost 电路 DCM 模式的大信号和线性化的交流小信号模型。利用 Simulink 软件,搭建了 2 种模型的受控源等效电路和实际的 Buck-Boost 开关电路。得出以下结论:

(1) 大信号模型和小信号模型在宏观时间尺度上可以较好地模拟实际开关电路的动态特性。由于没有开关纹波,数值仿真的步长可以设置得比开关电路模型更大,节省了计算量。

(2) 小信号模型只能用来求解扰动较小的情况,当扰动过大时,由于泰勒公式二阶交流项幅值较大,小信号模型求解的误差较大。

【参考文献】

- [1] 徐德鸿.电力电子系统建模及控制[M].北京:机械工业出版社,2018.
- [2] KARIMI M, PICHAN M, ABRISHAMIFAR A, et al. An improved integrated control modeling of a high-power density interleaved non-inverting buck-boost DC-DC converter[J]. World Journal of Engineering, 2018, 15(6): 688.
- [3] 张勇敢,宋树祥,廖志贤,等.电动汽车新型光伏充电桩 DC-DC 变换器的研究与设计[J].广西大学学报(自然科学版),2018,43(5): 1765.
- [4] 牟健,何波贤,梅杰,等.基于 STM32F334 双向同步整流 BUCK-BOOST 数字电源设计[J].电子产品世界,2018,25(9): 52.
- [5] 徐慧芳,涂德凤,张帆.DCM 模式下非理想 BUCK 变换器的建模与仿真[J].赤峰学院学报(自然科学版),2017,33(21): 41.
- [6] 闻彰.微波 GaN HEMT 大信号模型参数提取研究[D].成都:电子科技大学,2018.
- [7] 侯春鹏.多频段平面 LTE 手机天线的研究与设计[D].重庆:重庆邮电大学,2017.
- [8] LOVE J S, HASKETT T C. Measuring inherent structural damping of structure-TMD systems [J]. Engineering Structures, 2019, 196: 109300.
- [9] 高青.低纹波输出的多相交错并联 Buck 变换器研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- 收稿日期: 2019-07-31
- (上接第 42 页)
- [4] 杨明,郝亮,徐殿国.基于自适应陷波滤波器的在线机械谐振抑制[J].哈尔滨工业大学学报,2014, 46(4): 63.
- [5] 康逸儒,沈汉林,罗欣.基于 SDFT 和自适应三参数陷波器的快速机械谐振抑制[J].微电机,2018,51 (5): 25.
- [6] ZHENG E, LIU Z, MA L. Study on harmonic detection method based on FFT and wavelet transform [C] // 2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems, 2010, 3: 413.
- [7] 熊琰,李叶松.基于频率特性搜索的伺服系统谐振控制[J].电气传动,2015,45(2): 39.
- [8] 马凯莉.基于自适应陷波滤波器的单相光伏并网逆变器无功和谐波补偿问题的研究[D].杭州:浙江大学,2015.
- [9] 许征杰,王正仕.应用自适应陷波滤波器进行电力系统谐波检测的改进算法[J].电源学报,2015, 13 (4): 64.
- [10] BAHN W, KIM T, LEE S, et al. Resonant frequency estimation for adaptive notch filters in industrial servo systems[J]. Mechatronics, 2017, 41: 45.
- 收稿日期: 2019-08-07